N° d'enregistrement
au C.N.R.S.
A.O.11.499

ARTICLE PRINCIPAL RECOUVRANT EN PARTIE

LA THESE PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU TITRE DE

DOCTEUR INGENIEUR

A L'UNIVERSITE DE PARIS VI , PIERRE ET MARIE CURIE

PAR

CHARLES VILLEMAIN

SUJET DE LA THESE

ETUDE DE REGULATION ROUTIERE PAR SIGNAL OPTIQUE

SOUTENUE LE : 28 MAI 1975

DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN COMPOSEE DE :

- M . J.L. DESTOUCHES — President
- M . J. GEFFROY — Examinateur
- M . J. LAPLUME — Examinateur

N° d'enregistrement
au C.N.R.S.
A.O.11.499

ARTICLE PRINCIPAL RECOUVRANT EN PARTIE

LA THESE PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU TITRE DE

DOCTEUR INGENIEUR

A L'UNIVERSITE DE PARIS VI , PIERRE ET MARIE CURIE

PAR

CHARLES VILLEMAIN

SUJET DE LA THESE

ETUDE DE REGULATION ROUTIERE PAR SIGNAL OPTIQUE

SOUTENUE LE : 28 MAI 1975

DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN COMPOSEE DE :

- M . J.L. DESTOUCHES — President
- M . J. GEFFROY — Examinateur
- M . J. LAPLUME — Examinateur

A.D.11.199

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

la régulation routière
PROBLEME, PRINCIPES, SOLUTION

Par Ch. A. VILLEMAIN
Conseil en méthodologie
à Sodeteg Engineering

Note d'information sur le procédé de régulation optique par signaux pilotes

Que signifie réguler ?

C'est transformer un flux irrégulier et dont l'écoulement peut même s'arrêter intempestivement, en un flux à écoulement continu, ou tout au moins à variations faibles.

Le flux des automobiles a cependant une caractéristique très particulière :
du fait de l'existence de croisements sur un même plan. Ce flux est obligatoirement *pulsé* et scindé en pelotons de véhicules.

Il sera régulé si chacun d'eux passe aux croisements sans subir d'arrêts.

Alors leur mouvement sera continu, et les variations de vitesse d'un point à un autre et d'un véhicule à l'autre seront faibles.

Les vitesses instantanées en un point seront proches de la vitesse moyenne « normale » la plus compatible avec les conditions d'environnement de la voie de circulation en ce point.

Est-ce possible ?

Oui sous deux conditions :
Il faut prouver l'existence des lois mathématiques et physiques régissant le problème, et il faut l'expérimenter et l'éprouver avec des automobilistes.

C'est ce que nous avons fait de 1966 à maintenant.

Comment des pelotons peuvent-ils théoriquement se croiser dans un réseau urbain dont la maille est très irrégulière — telle celle de Paris — sans devoir s'arrêter aux carrefours ?

Le phénomène de pulsation est un phénomène périodique qui apparaît sous deux aspects :
— les couleurs des feux de passage changent périodiquement
— les pelotons passent sur la voie de manière périodique.
Or pour qu'un phénomène dans lequel entrent des éléments divers périodiques soit lui-même *périodique* et *stable* il faut que la période de chacun des éléments qui le compose — ici les feux — soit *la même.*

Et rien ne s'oppose, ni en théorie, ni en pratique que tout ou partie d'un réseau urbain soit réglée à la même période, même s'il y a plus de deux voies concourantes aux carrefours ; nous avons étudié ce point en détail.

Cependant, dans un réseau à maille irrégulière, il convient d'*adapter* la vitesse moyenne *entre chaque* carrefour, afin que la tête d'un peloton parvienne au carrefour à l'instant précis où le cycle du feu donne le passage au vert.

Cette adaptation répond à des critères de temps de parcours très strict liés à la période, et l'application des mathématiques des ensembles et de l'algèbre de Boole permet de la définir, d'en calculer les caractéristiques et de montrer qu'elle est toujours possible.

Mais ce croisement des véhicules dans un réseau à niveau, sans arrêt préalable et sans collision, est-il possible « pratiquement » ?

Oui, parce que l'étude de réseaux de diverses villes montre que les vitesses « raisonnables » peuvent varier dans une très large mesure. Par exemple entre 12 et 54 km/h elle varierait de 1 à plus de 4.

Mais pour que le conducteur puisse dans tous les cas adapter *matériellement* sa vitesse à la vitesse nécessaire sans faire jouer son tempérament et les caractéristiques de nervosité de sa voiture, il ne doit se servir que le *moins possible* de son changement de vitesse. C'est-à-dire abandonner la notion de *changement* de vitesse avec sa brusquerie pour celle de *variation* de vitesse avec sa continuité.

Il obtiendra cette conduite par le seul jeu de la pédale d'accélération et du frein moteur.

Encore faut-il qu'il soit *informé* à tout instant, de façon simple, presque inconsciente, de ce qu'il doit faire.

Quelle est, en premier lieu, l'information qu'il est nécessaire de transmettre au conducteur ?

On pense en général qu'il faut transmettre une information de vitesse souhaitée.
Or, dans ce cas, il y a deux inconvénients :
D'abord le conducteur doit faire *deux lectures* avant d'en tirer une conclusion sur la conduite à tenir : la vitesse qui lui est demandée, et celle qu'il lit sur son compteur, d'où un effort intellectuel et un temps de réaction non négligeable. Ensuite la demande, comme la réponse, ne peuvent être précises et s'adapter exactement au résultat à obtenir ; or, s'il y a erreur, elle se cumule le long du parcours.
Par exemple une erreur de 10 % par rapport à la vitesse nécessaire donnera un écart de position de 10 mètres au bout de 100 mètres, mais de 100 mètres au bout d'un kilomètre de parcours et les voitures seront arrêtées par les feux.

L'information nécessaire est donc une information de *position* à un instant donné.

Si en effet une erreur de position de 20 mètres se produit à un instant donné et se maintient tout au long d'un parcours, elle n'entraînera aucune perturbation sensible au système ; l'automobiliste passera aux feux sans arrêt préalable.

Enfin le conducteur, déjà conscient de sa position, n'aura à recevoir que l'information de position souhaitée pour agir sur son comportement.

Comment, alors, transmettre cette information de position au conducteur ?

Pour éviter toute lecture, il suffit d'émettre un signal lumineux *à l'emplacement* même où l'on demande au conducteur de se placer à un *instant* donné. Ce signal, *extérieur* à la voiture, ne gênera pas la conduite de l'automobiliste comme le ferait un signal intérieur à sa voiture.

Le temps d'émission sera bref, mais suffisant pour qu'il soit nettement perçu par le conducteur : Expérimentalement, nous avons établi qu'il est d'environ 1 seconde. Au bout d'un laps de temps constant — établi à 2,5 secondes environ pour des raisons tenant à la physiologie des conducteurs dans certaines conditions —, le conducteur recevra un autre signal vert, de une seconde, émis à partir du point d'émission suivant placé à une distance adéquate du premier.

La position relative du conducteur par rapport au point d'émission du nouveau signal vert aura légèrement changé. La préoccupation de celui-ci sera de rétablir cette même position relative, en accélérant s'il est allé trop lentement, en ralentissant s'il a été trop vite. Ainsi, il sera piloté selon le programme d'émission des signaux dont on sait qu'il optimise à tout moment la position souhaitée de chaque véhicule dans le réseau.

Mais où placer, le long du parcours, les points d'émission des signaux ?

On peut penser à les suspendre au-dessus de la chaussée sur des caténaires, ou bien les fixer aux supports existants tels les candélabres ou les placer sur le flanc de la bordure du trottoir, ou encore sur la chaussée elle-même.

Cette dernière solution a l'avantage de différencier chacune des voies de circulation, comme le fait le chemin de fer obligé, par définition, de localiser exactement ses voies et ses aiguillages. Il sera possible alors de piloter à des vitesses éventuellement différentes deux pelotons circulant en parallèle, puis de réaliser des mises en série en cas de rétrécissement permanent ou temporaire de la voie.

Par exemple, à l'emplacement des travaux qui immobilisent une voie sur deux, on peut maintenir sans engorgement le débit de véhicules observé en amont, sans perturber le régime périodique du réseau. De même, le passage des ambulances et des pompiers peut être assuré par un régime d'urgence particulier mis en place par le programmateur en une période, c'est-à-dire en un temps voisin d'une minute.

Un conducteur non averti comprendra-t-il la signification des signaux ? Sinon, qu'adviendra-t-il ?

Pour se rendre compte que la simultanéité entre le vert du signal placé le long de la chaussée et le vert du feu de carrefour est toujours réalisée par le système, il suffit d'avoir passé deux carrefours et de constater ensuite que le phénomène se reproduit toujours de la même manière. De plus, si les conducteurs placés en tête du peloton ont compris le système et veulent bien s'astreindre à utiliser les informations correspondantes, toutes les voitures qui les suivent devront se mettre au même rythme, même s'ils ne soupçonnent pas l'existence de la régulation. Seuls les derniers traînards seront arrêtés par les feux de carrefour et seront en position de... se poser des questions. Si, d'autre part, une majorité de conducteurs — par un masochisme collectif assez invraisemblable — refusaient de suivre les signaux, la situation actuelle réapparaîtrait sans qu'il s'y ajoute des maux supplémentaires.

De toute façon, l'expérience a prouvé, dans le cas précis d'une expérimentation sur un circuit d'essai, qu'il n'était même pas nécessaire d'informer les participants du but du système pour qu'ils le comprennent immédiatement et vantent les mérites de la conduite-confort qu'ils ont ressenti.

Le système est-il coûteux ? Comment peut-il être mis en place dans une ville très embouteillée ?

Il est d'un coût très inférieur au système actuel de signalisation de carrefour mais, certes, il s'y ajoute. Cependant, il multiplie l'efficacité de celui-ci dans des proportions telles qu'il peut rendre inutiles bien des travaux d'aménagement des rues.

Il ne nécessite aucun travail de Génie Civil dans le cas d'utilisation de feux au sol, encastrés à l'emplacement des bandes peintes actuelles qui individualisent les voies, reliés par des bandes de plastique collées sur la chaussée dans lesquelles passent les câbles de signalisation.

Cette technologie particulière est connue et éprouvée dans l'industrie.

Pour mettre en place le système dans un réseau urbain, il faut commencer par une zone périphérique, limite des zones centrales embouteillées, et gagner ensuite par étapes en taches d'huile. Les équipements de zone sont compatibles entre eux et ne demandent pas obligatoirement un équipement central.

A l'entrée dans la ville, le premier feu fait l'objet d'un équipement particulier qui permet de diviser le flux en pelotons afin que ce feu ne provoque pas d'arrêts intempestifs qui sont particulièrement dangereux.

Quels pourraient être les résultats globaux d'un tel système ?

Dans l'état actuel de la circulation, avec arrêts très fréquents aux carrefours, une file arrêtée ne peut passer que 10 véhicules dans un demi-cycle de 30 secondes de vert, dans 50 % des cas, c'est-à-dire un véhicule en 3 secondes en moyenne.

S'il y a embouteillage, c'est-à-dire que la voie en aval du carrefour n'est pas libre, il ne peut passer qu'un véhicule en 9 secondes environ.

Or, on constate et mesure qu'une file qui ne s'arrête pas peut passer à raison d'une seconde par véhicule, soit de 3 à 9 fois plus selon qu'il y a, ou non, embouteillage.

Les conséquences de ce fait sont considérables : La pollution automobile est diminuée des 2/3, la consommation au kilomètre en ville est réduite de moitié environ, la vitesse moyenne individuelle généralement triplée aux heures de pointe. Enfin, les accidents aux carrefours entre deux véhicules antagonistes deviennent hautement improbables puisque, lors du passage d'un peloton, le peloton antagoniste est encore en mouvement, à bonne distance de carrefour.

N'oublions pas enfin que les seuls embouteillages imposent chaque année, à chaque pays d'Europe Occidentale, une perte économique évaluée à 5 milliards de francs actuels. Leur suppression aurait donc des conséquences non négligeables.

Comment peut-on démontrer que le système donnera bien les résultats escomptés là où il sera utilisé sur la voie publique ?

En premier lieu, l'aspect mathématique ne peut souffrir de contradictions. L'étude a été poussée très loin et fait maintenant l'objet d'un véritable corps de doctrine. Elle a donné lieu à des discussions serrées avec des spécialistes hautement qualifiés.

Divers cas d'espèce sont à l'étude, par exemple les régimes périodiques simultanés de périodes multiples les unes des autres. Les principes initiaux se trouvent confirmés et approfondis au fur et à mesure des développements particuliers.

L'aspect physique, concernant l'aptitude du véhicule lui-même à maintenir certaines caractéristiques de vitesse et de position compte tenu du parcours, a été expérimenté et a donné des résultats précis immédiatement utilisables dans l'établissement des programmes d'ordinateur.

Enfin, l'aspect psychologique, celui de la réaction des conducteurs, a fait l'objet, rappelons-le, de constatations sans ambiguïté.

Il reste à dire en conclusion que l'une des plus importantes firmes d'engineering européen s'intéresse depuis 1968 au développement de ce procédé ;
que des sociétés industrielles ont étudié le matériel et sont à même de réaliser et à le mettre en place dans des délais inférieurs à un an ;
et qu'il suffit d'un équipement de quelques kilomètres de voie publique quelque part dans le monde, pour quelques centaines de milliers de francs, pour que la preuve soit faite qu'un problème réputé insoluble ait enfin trouvé sa solution.

Si, cependant, la routine et la peur des décisions font encore obstacle à cette innovation comme à bien d'autres, nous pensons que l'opinion publique internationale dûment avertie saura exiger qu'un intérêt scientifique et technique remplace l'actuelle indifférence qui enveloppe ce procédé, trop révolutionnaire pour faciliter sa crédibilité.

Son application et sa généralisation viendront ensuite d'elles-mêmes.